第 31 卷 第 1 期 原 子 核 物 理 评 论 Vol. 31, No. 1
2024 年 2 月 Nuclear Physics Review Feb., 2024

文章编号： 1007-4627(2024) 01-0001-07

上海激光电子伽马源的伽马活化实验平台建设

杨宇萱[1,2]，张 岳[3]，赵维娟[1]，王宏伟[2,3,4]，范功涛[2,3,4]，许杭华[3]，刘龙祥[3]，郝子锐[3]，李志才[3,5]，金 晟[2,4]，陈开杰[2,6]，焦 普[3,7]，周梦蝶[3,7]，王振伟[2,4]

(1. 郑州大学，郑州 450001；
2. 中国科学院上海应用物理研究所，上海 201800；
3. 中国科学院上海高等研究院，上海 201210；
5. 南华大学，衡阳 421001；
4. 中国科学院大学，北京 100080；
6. 上海科技大学，上海 201210；
7. 河南师范大学，新乡 453007)

摘要：上海激光电子伽马源（Shanghai Laser Electron Gamma Source，SLEGS）是通过激光与电子逆康普顿散射产生准单能、能量连续可调的兆电子伏伽马束，是目前国际上唯一一台可连续变换碰撞角度的激光康普顿散射（Laser Compton Scattering，LCS）伽马源装置。伽马活化是研究材料特性的有效手段之一，本文介绍了上海激光电子伽马源的伽马活化平台情况、包括在线活化过程，离线低本底测量，高纯锗（High Purity Germanium，HPGe）探测器的能量效率刻度等。目前的简易低本底屏蔽使得测量系统本底计数率降低到约 5.2 cps/(60 keV-3 MeV 能区)。SLEGS 伽马源的活化平台为开展伽马活化测量研究提供了有利条件，未来在核物理、核天体物理、医学应用、材料科学和环境科学等领域的研究将会发挥重要的作用。

关键词：伽马源；伽马活化；低本底测量；SLEGS

中图分类号：O571.1;0571.42+4 **文献标志码：**A **DOI：**10.11804/NuclPhysRev.31.01.01

1 引言

伽马射线是核技术及应用研究的理想探针之一，能穿透较厚物质并产生电离和激发作用，广泛应用于核反应、核结构、核能和核医学等领域。活化方法包括质子活化，中子活化和伽马活化等。活化测量广泛应用在核反应截面测量、核能源开发及核废料处理、核素成分分析、束流标定、医学和考古等领域[1-2]。我国建设有多类型的中子源和质子源，例如反应堆热中子源、DD/DT 快中子源[3]，基于加速器的钍基熔盐堆白光中子源[4]、中国散裂中子源（CSNS）[5] 等，以及广泛使用的静电加速器、串列加速器质子源，这些源装置大大促进了中子活化和质子活化技术在核分析、材料检测、医学应用等方面的发展。伽马活化是除质子活化方法和中子活化方法之外的一种重要的活法技术。在伽马活化方法中，原子核吸收高能 γ 射线，导致靶核被激发至短寿命的激发态。随后，靶核通过发射次级射线或粒子（如 γ、中子、质子、α 粒子或裂变产物）而生成具有放射性的剩余核。通过测量剩余核在退激发时发射的特征 γ 射线，能够确定剩余核的性质。这一方法为深入研究核反应和核结构提供了有力的手段，为深入理解原子核的性质和衰变提供了重要的信息。早期基于加速器产生的韧致辐射 γ 射线和核反应 γ 射线对伽马活化技术进行了探索研究，利用韧致辐射对碳、氮、氧、钪、铜等核素含量的测定[6-7]，并对韧致辐射伽马源的伽马活化方法可行性进行了分析[8]。中国原子能科学研究院利用质子俘获反应的 9.17 MeV 单能伽马对 ^{197}Au(γ,n) 反应截面进行了活化测量[9]。由于伽马源装置数量稀少，因此影响了伽马活化方法在国内的应用发展。

2021 年 12 月上海激光电子伽马源（SLEGS）成功验收[10-11]，给我国伽马活化方法的研究提供了新的平台。上海激光电子伽马源是基于上海光源同步辐射储存环 3.5GeV 电子与10.64 μm CO_2 激光碰撞产生兆电子伏的

收稿日期：2024-02-28； **修改日期：**2024-02-28
基金项目：科技部重点研发计划 (2022YFA1602404)；国家自然科学基金 (No.12275338, 12005280)；核数据重点实验室基金 (JCKY2022201C152)；中国科学院国际人才计划项目 (2021VMA0025)
作者简介：杨宇萱 (1995–), 女, 河南鹤壁, 现为联合培养在读博士研究生, 从事核物理实验研究; E-mail: yangyuxuan@sinap.ac.cn
通信作者：E-mail: zwj@zzu.edu.cn
通信作者：E-mail: wanghw@sari.ac.cn

γ 射线的伽马源。SLEGS 有斜入射和背散射两种工作模式，分别对应 20-160 度和 180 度碰撞角度，通过调整激光与电子束的碰撞角度可产生能量连续可调的准单能伽马束流[12-15]，伽马能量范围为 0.25-21.7 MeV，积分通量为 2.1×10^4-1.2×10^7 photons/s。SLEGS 可开展核物理，核天体物理等基础研究和伽马辐照、伽马成像等应用基础研究。SLEGS 的伽马能区覆盖了光核反应的矮共振和巨共振能区，有利于伽马活化方法的研究，基于 SLEGS 的伽马活化方法可对伽马束流通量标定，医用同位素光核反应截面[16-17]，核天体物理关键核素的光核反应截面测量等开展研究[18]，为我国光核反应数据库和医学应用等方面作出重要贡献。本文第三章介绍了 SLEGS 的活化平台，第四章介绍了低本底装置的能量和探测效率刻度。

2 伽马活化原理方法介绍

在光核反应 $A(\gamma,b)C$ 中，束流通量为 ϕ_b (1/s) 的 γ 束流轰击面密度为 $n_A(atoms/cm^2)$ 的靶核 A，反应的粒子个数为 N_{reac} (1/s)，可得反应截面 σ_{reac} 为：

$$\sigma_{reac} = \frac{N_{reac}}{n_A\phi_b}, \tag{1}$$

如果剩余核 C 具有放射性就可以通过退激 γ 射线来测量。λ (1/s) 是衰变常数，半衰期 $T_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda}$ (s)。

$$N_{prod} = \sigma_{reac} n_A C_{i\gamma} A_b \sum_{i=1}^{n} \phi_b \frac{1-e^{-\lambda t_{irrad}}}{\lambda} e^{-\lambda t_{irrad}(n-i)}, \tag{2}$$

t_{irrad} 为辐照时间，剩余核的产额为 N_{prod}，靶的丰度为 A_b，$C_{i\gamma} = e^{-(\mu/\rho)_o x}$ 为入射伽马衰减因子，x (g/cm^2) 为面密度，由美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology-NIST）数据库可得：

$$N_{decay} = N_{prod} e^{-\lambda t_w} \left(1 - e^{-\lambda t_m}\right), \tag{3}$$

剩余核衰变的个数为 N_{decay}, t_w 为辐照结束到离线 HPGe 测量计数开始所经过的冷却时间。t_m 为离线测量时间。

$$N_\gamma = N_{decay} I_\gamma \eta\, C_{o\gamma}, \tag{4}$$

N_γ 探测器测到的有效计数，I_γ 为伽马相对强度，由美国国家核数据中心 (National Nuclear Data Center-NNDC) 数据可得；η 为探测效率。$C_{o\gamma} = e^{-(\mu/\rho)_o x}$ 为衰变特征伽马的衰减因子[19]。辐照时长通常由所研究的反应产物来确定，产生放射性核素的产额随时间的增加逐渐达到饱和。超过三个半衰期的辐照时长并不能提供额外的产额，停止辐照后，产生的放射性核素随指数衰变。活化、冷却及测量过程如图1所示。

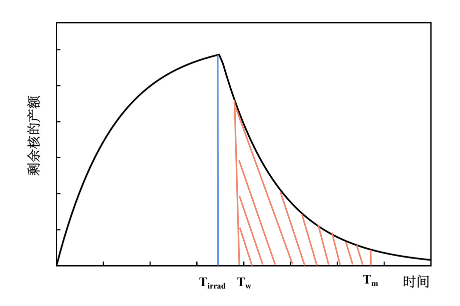


图 1 伽马活化测量的产额与时间关系图（在线彩图）

伽马反应截面一般在毫巴（mbar）量级，对于重核来说通常在500 mbar 以下，轻核在100 mbar 以下，因此伽马活化可以不用较长的冷却时间，活化后即可开始离线测量，对一些短寿命核素的测量更有利。作为一类重要的活化技术，伽马活化的研究领域有：

1) 伽马活化流强监测研究：在韧致辐射伽马源，激光电子伽马源装置中用来标定和监测束流强度；
2) 伽马活化无损检测研究：通过伽马活化分析 (Gamma Activation Analyses-GAA) 测量古金币、青铜器等材料中的核素成分，分析其产地、来源和年代等；
3) 伽马活化核素截面研究：在核天体物理 p 过程，医用同位素的产生等领域，可以用来测量关键核素的共振截面数据。

束流通量是伽马束流的一项关键指标，伽马束流通量的精确测量是核反应截面测量必不可少的物理量。通过在线活化和离线衰变测量可以很好的标定伽马束流通量。图2为可用来伽马束流监控的一些短寿命核素的反应截面。利用现有的这些核素的反应截面，可以对伽马束流通量进行监控。基于 SLEGS 活化分析技术同样可以开展医用同位素的光核反应截面测量，以及开展一些放射性核的截面测量，例如核天体物理 p 过程低丰度的核素截面的测量，其光核反应截面的测量对了解核天体核素核合成具有重要意义[20]。

3 伽马活化平台布局

SLEGS 的伽马活化实验平台位于上海光源实验大厅 BL03SSID 光束线实验棚屋的束流出口前端，如图3所示，设计有多个可方便插拔靶架，可同时活化多种靶材，对伽马束流进行充分利用，伽马束斑可利用粗准直器选择

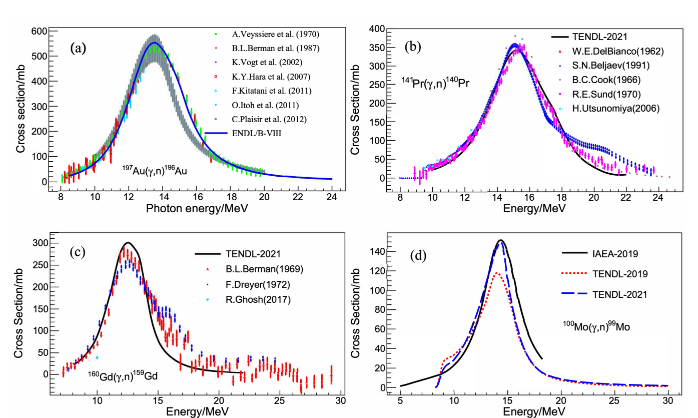


图 2　束流通量监测核素的光核反应截面（在线彩图）

Φ2 mm 或者 Φ3 mm 尺寸，采用 Φ10 mm 直径活化靶片即可。实验棚屋末端为可变厚度铜衰减装置（临时设置）和放置于束流垃圾桶内的大尺寸 $LaBr_3$ 探测器用于在线监控衰减后的束流通量。$LaBr_3$ 探测器的信号由 CAEN DT5730B 波形采样器采集，CAEN CoMPASS 进行数据获取并在线分析。

由于采用准直孔限束，因此伽马束斑和 SLEGS 束线直通的同步辐射及韧致辐射 X 射线束斑一致，因此束斑定位采用捷克产光子计数 X 射线硅位置灵敏探测器（MiniPIX），采用欧洲核子中心（CERN）研发的 Timepix 芯片（256 x 256，像素大小 55 µm），可以实现 X 射线位置和能量的测量，适用于成像、衍射、谱学、粒子追踪及空间辐射探测的研究。机械控制平台调节靶架位置位于束流中心，配合使用具有特殊形状的定位靶片及 Minipix 成像探头可以精准准直定位。束斑测量如图4所示：

4　伽马活化低本底测量

SLEGS 计划建设两台离线低本底活化测量装置，由 ORTEC 的 P 型高纯锗（HPGe）探测器和低本底铅砖屏蔽组成，可满足交替离线测量的需求。HPGe 的参数如表1所示，同时设计离线测量靶架如图3插图所示，准确约束活化靶与 HPGe 的相对位置，可用来离线测量活化靶的退激伽马射线和 HPGe 的探测效率刻度。

表 1　采用的同轴型 ORTEC HPGe 探测器参数

ORTEC	GEM-50195-P	GEM-70200-P
晶体直径	67.1 mm	69.6 mm
晶体长度	65.5 mm	90.1 mm
铝窗厚度	1.0 mm	1.0 mm
表面死层	700 um	700 um
出厂分辨	1.69keV@1.33MeV	1.85keV@1.33MeV
探测效率	55.2%@1.33MeV	74.2%@1.33MeV
推荐高压	+2200 V	+2500V

γ 射线入射到 HPGe 探测器灵敏区中发生光电效应，康普顿效应，正负电子对产生等，使用 ORTEC 659 高压模块对 HPGe 探测器施加偏压，通过外加偏压使电子在外加电场的作用下被收集，在输出电路中形成脉冲电信号被 CAEN V1730s 波形采样器记录，同时进行梯形滤波等转换分析处理，从而得到入射 γ 射线的能量，并在 CoMPASS 数据获取软件中实时获取。如图5所示，可以实时查看活化靶的衰变特征 γ 射线。

4.1　本底测量

天然本底主要由环境中的天然放射性核素，宇宙射线和屏蔽材料中的放射性核素产生的。铅砖对 γ 射线有很好的屏蔽效果，采用低本底铅砖能够有效的屏蔽环境天然 γ 射线本底。在无屏蔽、50 mm 普通铅砖屏蔽、50 mm 低本底铅砖、100 mm 低本底铅砖四种情况下进行本底测量，结果如图6所示：低本底铅砖对500 keV 以下的 γ 射线很好的屏蔽作用；50 mm 厚的低本底铅砖获得 60 keV～3 MeV 能区的本底计数约为 12 cps；100 mm 厚低本底铅砖获得 60 keV～3 MeV 能区的本底计数约为 5.2 cps，可以看到简单的低本底铅砖即对天然 γ 射线本底具有较好的屏蔽效果。

4.2　HPGe 探测器刻度

离线测量活化反应靶衰变特征 γ 射线前，需要对 HPGe 探测器进行能量刻度和效率刻度。使用 ^{57,60}Co,^{137}CsI,^{241}Am,^{152}Eu 标准刻度源，源参数如表2所示，以及利用硅酸钇镥闪烁晶体（LYSO）中的 ^{176}Lu 和氯化钾中 ^{40}K 对 HPGe 进行能量刻度和效率刻度。HPGe 探测器全能峰的效率 ϵ 可由以下公式表示：

$$\epsilon = \frac{N}{A_0 e^{-\lambda T} B_r t} F_{tsc}, \tag{5}$$

其中 N 是全能峰内 γ 射线计数，A_0 是放射源出厂时标定的活度，T 是测量前与放射源出厂的时间差，t 是测量时间，B_r 是特征 γ 射线的比活度，F_{tsc} 为加和修正系数，利用蒙特卡罗程序 GEANT4 模拟进行加和效应修正[21]。HPGe 探测器的探测效率 ϵ 可由多参数指数公式 (6)进行拟合。

$$\epsilon = e^{a+blnE+clnE^2+dlnE^3+elnE^4+flnE^5}, \tag{6}$$

其中 E 为 γ 射线的能量，单位为 keV, 测量的探测效率如图7(b) 所示，其中拟合参数 a= 51.7708, b=-35.05867, c=0.1243, d=-1.9167, e=-0.3257, f=-29.8688。

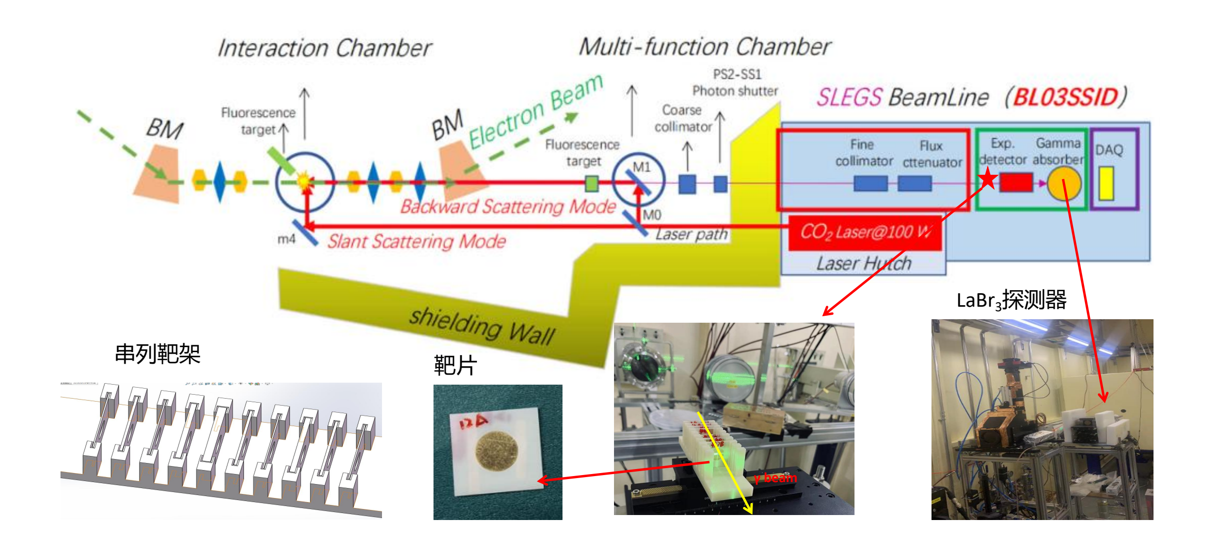


图 3 SLEGS 活化平台（照片从左至右为 a：活化靶架，b: 活化靶片，c: 活化位置，d: $LaBr_3$ 在线束流监控）（在线彩图）

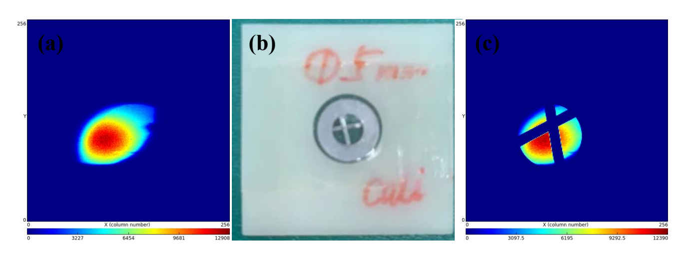


图 4 MiniPIX 测量束斑及位置定位（a：3 mm 束斑，b: 定位靶片，中心为金属十字丝，c: 经过定位靶片的束斑图像）（在线彩图）

表 2 HPGe 探测效率刻度刻度使用的放射源。

放射源	γ 能量 (keV)	分支比I_γ	活度 (kBq)	半衰期 (year)
^{241}Am	59.54	0.359	6.516	432.6
^{57}Co	122.06	0.8569	80.73	0.744
	136.47	0.1068		
^{137}Cs	661.66	0.851	8.177	30.17
^{60}Co	1332.49	0.9998	81.96	5.272
	1173.23	0.9985		
^{152}Eu	40.12	0.377	24.5	13.517
	121.78	0.2853		
	344.28	0.266		
	778.90	0.1293		
	964.06	0.1451		
	1085.84	0.1011		
	1112.08	0.1367		
	1408.013	0.2087		

5 研究与展望

SLEGS 伽马活化平台已经完成了第一台 HPGe（ORTEC GEM-70200-P）低本底屏蔽及离线测试测量, 通过金靶的活化测量, 获得了较好的伽马束流强度数据, 与安装在束线末端的 $LaBr_3$ 在线测量的伽马通量数据在误差范围内符合一致，检验了 SLEGS 活化测量技术的可靠性，目前已经完成了一批短寿命放射性核素的活化测量，实验数据稍后将会发表，第二台 HPGe（ORTEC GEM-50195-P）低本底屏蔽正在组建中。SLEGS 伽马活化平台的建设和伽马活化方法学的研究已经逐步建立起来了，基于这个平台，我们已经可以利用光核反应开展多种伽马活化研究[22]。

参考文献

[1] SEGEBADE C, BERGER A. Photon activation analysis[M/OL]// MEYERS R A. Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons, Ltd, 2008: a6211.pub2. DOI: 10.1002/9780470027318.a6211.pub2.

[2] SEGEBADE C, STAROVOITOVA V N, BORGWARDT T, et al. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2017, 312(3): 443. DOI: 10.1007/s10967-017-5238-6.

[3] HUANG Z W, WANG J R, WEI Z, et al. Journal of Instrumentation, 2018, 13(01): P01013. DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/P01013.

[4] WANG Hongwei, CHEN Jingen, CAI Xiangzhou, et al. Nuclear Techniques, 2014, 37: 120-124. (in Chinese) DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.100522
(王宏伟, 陈金根, 蔡翔舟, 等. 核技术, 2014, 37: 120.)

[5] Chen Hesheng. Modern Physics, 2016, 28: 3-10. (in Chinese) DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2016.01.001
(陈和生. 现代物理知识, 2016, 28: 3.)

[6] XU Yongdai. , 1979, : 137. (in Chinese)
(徐永代. 国际放射医学核医学杂志, 1979, 3(2): 137.)

[7] ZHANG Jinglie, ZHAO Zhenlan, LUO Shihua, et al. Nuclear Techniques, 1982, : 123. (in Chinese)
(张景烈, 赵珍兰, 罗世华, 等. 核技术, 1982, 4: 123.)

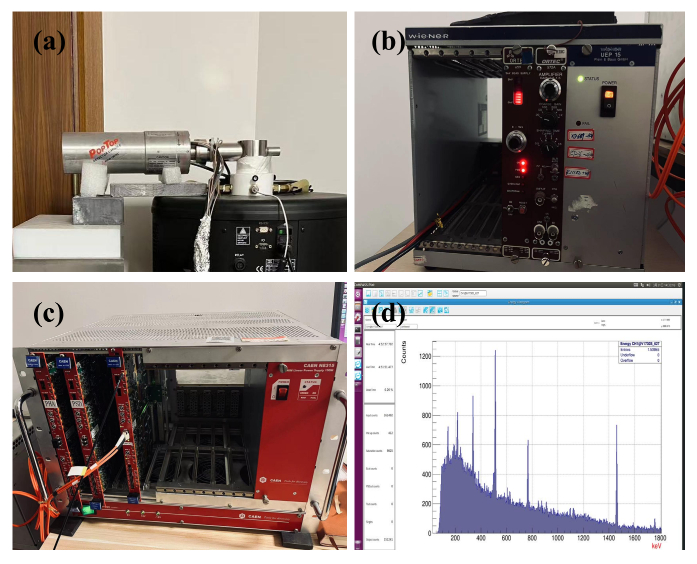


图 5　伽马活化离线低本底测量 (a:ORTEC HPGe GEM-70200-P 探头,b:ORTEC 659 高压模块,c:CAEN V1730s 波形采样器,d:CAEN CoMPASS 数据获取软件）（在线彩图）

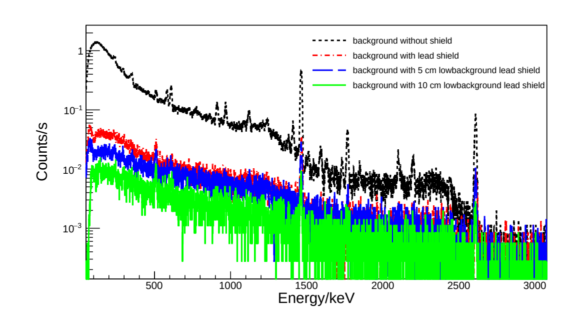
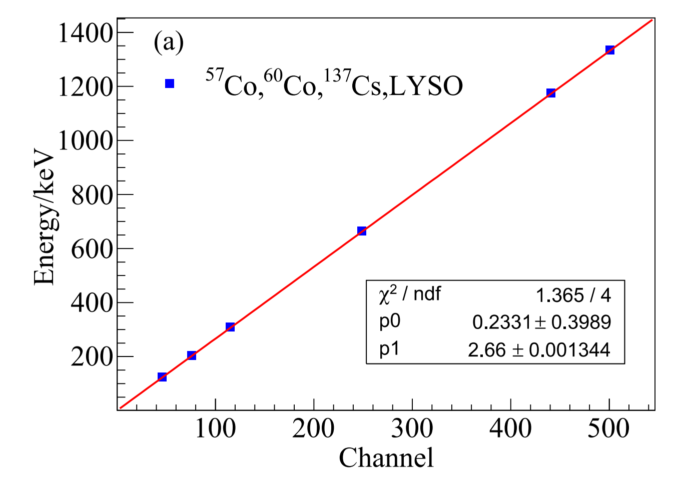


图 6　HPGe 探测器测量的环境本底及屏蔽后本底计数降低情况（在线彩图）

[8] FANG Yibing, MIAO Lin, PAN Qiyuan, et al. Nuclear Techniques, 1985, : 22. (in Chinese)
(方奕兵, 苗林, 潘企元, 等. 核技术, 1985, 6: 22.)
[9] DANG Y L, LIU F L, FU G Y, et al. Chinese Physics B, 2019, 28(10): 100701. DOI: 10.1088/1674-1056/ab3a8d.
[10] WANG H W, FAN G T, LIU L X, et al. Nuclear Science and Techniques, 2022, 33(7): 87. DOI: 10.1007/s41365-022-01076-0.
[11] WANG Hongwei, FAN Gongtao, LIU Longxiang et al. , 2020, 37: 53-63. (in Chinese) DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019043
(王宏伟, 范功涛, 刘龙祥, 等. 原子核物理评论, 2020, 37: 53.)
[12] XU H H, FAN G T, WANG H W, et al. Nucl Instr and Meth A, 2022, 1033: 166742. DOI: 10.1016/j.nima.2022.166742.
[13] HAO Z R, FAN G T, WANG H W, et al. Nucl Instr and Meth A, 2021, 1013: 165638. DOI: 10.1016/j.nima.2021.165638.
[14] HAO Z R, FAN G T, WANG H W, et al. Nucl Instr and Meth B, 2022, 519: 9. DOI: 10.1016/j.nimb.2022.02.010.
[15] HAO Zirui, FAN Gongtao, WANG Hongwei, et al. Nuclear Techniques, 2020, 43: 61-69. (in Chinese) DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.110501
(郝子锐, 范功涛, 刘龙祥, 等. 核技术, 2020, 43: 61.)
[16] HABS D, KöSTER U. Applied Physics B, 2011, 103(2): 501. DOI: 10.1007/s00340-010-4278-1.



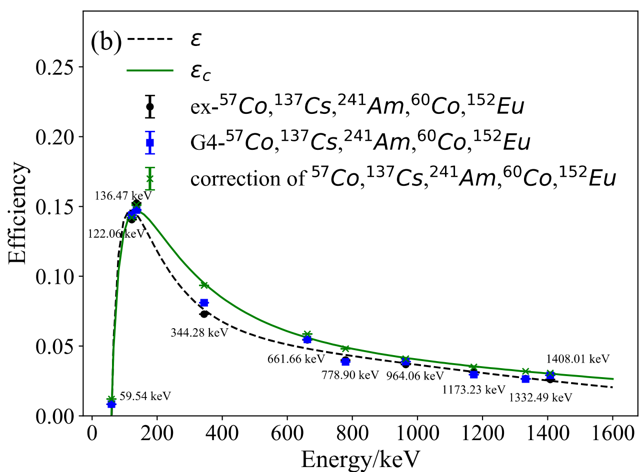


图 7　HPGe 探测器的能量刻度和效率刻度（a: 能量刻度，b: 效率刻度）（在线彩图）

[17] QAIM S M. Nuclear Medicine and Biology, 2017, 44: 31. DOI: 10.1016/j.nucmedbio.2016.08.016.

[18] GYURKY G, FULOP Z, KOPPELER F, et al. The European Physical Journal A, 2019, 55(3): 41. DOI: 10.1140/epja/i2019-12708-4.

[19] HUBBELL J H, SELTZER S M. NIST Standard Reference Database 126, 2004. DOI: https://dx.doi.org/10.18434/T4D01F.

[20] MOHR P, FüLöP Z, UTSUNOMIYA H. The European Physical Journal A, 2007, 32(3): 357. DOI: 10.1140/epja/i2006-10378-y.

[21] HE L C, DIAO L J, SUN B H, et al. Nucl Instr and Meth A, 2018, 880: 22. DOI: 10.1016/j.nima.2017.09.043.

[22] YANG Y X, ZHAO W J, CAO X G, et al. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 218: 111599. DOI: https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111599.

Construction of Gamma Activation Experimental Platform for Shanghai Laser Electron Gamma Source

YANG Yuxuan[1, 2], ZHANG Yue[3], ZHAO Weijuan[1], WANG Hongwei[2, 3, 4], FAN Gongtao[2, 3, 4], XU Hanghua[3], LIU Longxiang[3], HAO Zirui[3], LI Zhicai[3, 5], JIN Sheng[2, 4], CHEN Kaijie[2, 6], JIAO Pu[3, 7], ZHOU Mengdie[3, 7], WANG Xhengwei[2, 4]

(*1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;*
2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;
5. University of South China, Hengyang 421001, China;
4. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;
6. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;
7. Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Shanghai Laser Electron Gamma Source (SLEGS) is a quasi-monoenergetic, and energy-tunable MeV gamma-rays source generated by the inverse Laser Compton Scattering (LCS) of lasers and electrons. SLEGS is the only LCS gamma source in the world with a continuously variable collision angular range. The gamma activation analysis is one of the effective methods to study the properties of materials. This paper introduces the gamma activation platform of SLEGS, including the online activation experiment, the low background offline measurement, and the energy and efficiency calibration for the high purity germanium (HPGe) detector. The counting rate of the shielded HPGe has been controlled down to 5.2 cps/s within 60 keV-3 MeV region under the current low background environment. The activation platform of the SLEGS has provided favorable conditions for gamma activation measurements, which will play an important role in future research in the fields of nuclear physics, nuclear astrophysics, medical applications, materials science, and environmental science.

Key words: Gamma source; Gamma activation; Low background measurement; Shanghai Laser Electron Gamma Source

Received date: 28 Feb. 2024; **Revised date:** 28 Feb. 2024

Foundation item: The National Key Research and Development Program of China (2022YFA1602404);the National Natural Science Foundation of China (No. 12275338, No. 12005280), the Key Laboratory of Nuclear Data foundation (JCKY2022201C152) and the Chinese Academy of Sciences President's International Fellowship Initiative(No. 2021VMA0025).

Corresponding author: ZHAO Weijuan, E-mail: zwj@zzu.edu.cn

Corresponding author: WANG Hongwei, E-mail: wanghw@sari.ac.cn